





Functional Indicators of Condition Monitoring Through Oil Analysis to Reduce Breakdowns and Increase Machinery Efficiency

Amin Eskandarzadeh Sabet* , Hossein Habibi, Farhad Nazarizadeh 

* Phd student Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering , Semnan University, Semnan, Iran

(Received: 21/02/2022, Revised: 15/08/2022, Accepted: 19/12/2022, Published: 20/02/2023)

DOR: 20.1001.1.20089198.1401.24.77.1.4

ABSTRACT

The existence of a proper system for machine maintenance is an effective factor in the proper operation of the machine and reduction in maintenance costs. Condition-based maintenance, which is actually the most efficient method of maintenance, is done with different methods, the most important of which is the oil analysis method. In the oil analysis method, the properties and different materials resulting from the erosion and degradation of the oil of different parts of machines such as engine, gearbox, hydraulics, etc. are examined. The analysis of the results of different oil tests is based on the allowed amounts of erosion particles and other characteristics and components in the oil. The basis of the oil analysis is to represent the exact state of the active machine in a certain period of time. In this paper, with the approach of theoretical and field studies and using the information of more than 3000 construction machines, some ranges of functional indicators of the results of oil analysis are presented to reduce breakdowns and increase the efficiency of machines.

Keywords: Oil Analysis, Indicator, Breakdown Reduction, Machinery Efficiency

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: amin.esk@gmail.com

شاخص‌های کاربردی پایش وضعیت از طریق آنالیز روغن جهت کاهش خرابی و افزایش راندمان ماشین‌آلات

امین اسکندرزاده ثابت^{۱*} ID، حسین حبیبی^۲، فرهاد نظری‌زاده^۳ ID

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۲- دانشجوی دکتری آینده پژوهی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه ایوانکی، ایوانکی، ایران، ۳- استادیار گروه فناوری و راهبرد، دانشکده مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالکاشتر، تهران، ایران

DOR: 20.1001.1.20089198.1401.24.77.1.4

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۵/۲۴

چکیده

وجود یک سیستم مناسب برای نگهداری ماشین‌آلات، عامل بسیار مؤثری در عملکرد مناسب ماشین و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌باشد. نگهداری و تعمیرات مبتنی بر وضعیت ماشین که در حقیقت کارآمدترین روش نگهداری و تعمیرات است با روش‌های مختلفی انجام می‌شود که مهم‌ترین آن‌ها روش آنالیز روغن می‌باشد. در روش آنالیز روغن خصوصیات و مواد مختلف حاصل از فرسایش و تخریب روغن قسمت‌های مختلف ماشین‌آلات نظیر موتور، گیربکس، هیدرولیک و... مورد بررسی قرار می‌گیرد. تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف روغن بر پایه مقادیر مجاز ذرات فرسایشی و سایر ویژگی‌ها و محتویات موجود در روغن می‌باشد. اساس کار آنالیز روغن انعکاس وضعیت دقیق ماشین در حال کار، در یک دوره زمانی معین است. در این مقاله بر اساس مطالعات تئوری، میدانی و استفاده از اطلاعات بیش از ۳۰۰۰ ماشین‌آلات عمرانی محدوده‌هایی از شاخص‌های کاربردی نتایج آنالیز روغن جهت کاهش خرابی و افزایش راندمان ماشین‌آلات ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: آنالیز روغن، شاخص، کاهش خرابی، راندمان ماشین‌آلات

۱- مقدمه

آنالیز روغن روش جامعی است که به صورت مستقیم آسیب‌های سطوح را اندازه‌گیری می‌کند [۵]. با بررسی غلظت، اندازه، خواص شیمیایی، رنگ، شکل و خصوصیات سطح ذرات فرسایشی در نمونه روانکار جمع‌آوری شده اطلاعات بارزتری را می‌توان به دست آورد [۶-۷].

۲- روش‌های پایش وضعیت (CM)

روش‌های اشاره شده در زیر مهم‌ترین روش‌های پایش وضعیت (CM) مورد استفاده در حوزه ماشین‌آلات، تجهیزات و صنایع می‌باشند:

۲-۱- آنالیز ارتعاشات (Vibration Analysis)

در این روش ارتعاشات ماشین اندازه‌گیری شده و بر اساس آن وضعیت دستگاه سنجیده می‌شود و در صورت وجود عیب می‌توان عیب را تشخیص داد. این روش بیشتر برای ماشین‌آلات دوار بکار می‌رود. در این روش، به تحلیل اسپکتروگرام فرکانسی و سیگنال زمانی پرداخته می‌شود. اندازه‌گیری ارتعاشات به وسیله حسگرهای جابجایی، سرعت و شتاب صورت می‌گیرد. عموماً در اندازه‌گیری فرکانس‌های زیر ۲۰ هرتز و اندازه‌گیری حرکت نسبی از حسگر جابجایی؛ در اندازه‌گیری فرکانس‌های بین ۲۰ تا ۲۰۰۰

پایش وضعیت (Condition Monitoring) که به اختصار با CM نشان داده می‌شود، دربرگیرنده مجموعه عملیاتی است شامل دریافت، مطالعه و پردازش پارامترهای فیزیکی و شیمیایی مربوط به تجهیزات از طریق ارتعاش، صدا، عملکرد، روانکاری، دما و... و بررسی تغییرات آن‌ها در طول زمان، با هدف بررسی و گزارش وضعیت ماشین‌آلات. پایش وضعیت یکی از اجزای اصلی عملیات نگهداری پیش‌بینانه است. از آنجاکه اجرای پایش وضعیت با اهداف کاهش زمان توقف غیرمنتظره و تعمیرات، کاهش هزینه‌های تعمیرات و قطعات مصرفی، افزایش قابلیت اطمینان، بهره‌وری و کیفیت محصولات صورت می‌پذیرد، نوع تجهیزات مورد استفاده در جهت اجرای صحیح پایش وضعیت بسیار مهم است [۱]. تمرکز اصلی صنایع مختلف در جهت حداکثرسازی کارکرد ماشین‌آلات و حداقل‌سازی تعمیر و نگهداری و هزینه‌های اجرا است. برای رسیدن به این امر ایجاد یک برنامه منظم پایش وضعیت بسیار ضروری است، در اینجا روش‌های جامعی جهت پایش وضعیت ماشین‌آلات به کار گرفته شده است. آنالیز روغن یک روش بسیار خوبی جهت کنترل و علت‌یابی خرابی‌ها است [۲-۴].

* رایانامه نویسنده مسئول: amin.esk@gmail.com

پایش وضعیت یاتاقان‌های سرعت‌بالا، کولپینگ‌های سیالاتی، مخازن نگهداری و... مورد استفاده قرار می‌گیرد. [1,4,5,6]

۲-۵- مافوق صوت (Ultra Sonic)

در این تست، امواج فراصوت که دامنه آن‌ها بین ۰/۵ تا ۲۵ مگاهرتز هستند توسط یک مولد صوتی بر روی قطعه مورد آزمایش هدایت می‌شود. این امواج هنگامی که به ناپیوستگی‌ها و عیوب سطحی و زیرسطحی قطعه برخورد می‌کنند منعکس می‌شوند که توسط مولد صوتی این بازتاب‌ها دریافت گردیده و به پالس‌های الکتریکی تبدیل شده و در صفحه‌نمایش به صورت یک سیگنال ظاهر می‌گردد. اپراتور با بررسی این سیگنال‌ها می‌تواند به اطلاعات مختلفی از قبیل مکان، عمق، ابعاد و نوع عیب بر روی قطعه پی ببرد [1,4,7].

این آزمون می‌تواند عیوب را تا عمق ۵ متر در فولادها نشان دهد و درصد نفوذ و حساسیت آن در آشکارسازی عیوب صفحه‌ای و بحرانی نسبت به آزمون رادیوگرافی بالاتر است. از محدودیت‌های آن این است که کار با آن نیاز به تخصص و مهارت بالایی دارد، چه در انجام دادن آزمون بر روی سازه‌ها و چه در تفسیر و خواندن اطلاعات دریافتی توسط این آزمون. در این روش قطعات بسیار کوچک و نازک و قطعات ناهموار به‌سختی قابل تست شدن هستند و اگر ناپیوستگی و عیب کوچک و بسیار نزدیک به سطح باشد ممکن است تشخیص داده نشود. کاربرد این تست در تشخیص خرابی (به‌خصوص خرابی داخلی) تیغه و برج توربین بادی می‌باشد [1,4,7].

۲-۶- اندازه‌گیری کرنش (Strain measurement)

با استفاده از حس‌گرهای الکترونیکی می‌توان کرنش یا تغییرات نسبی طول یک جسم را اندازه‌گیری نمود، کرنش برابر با تغییرات طول یک ماده به حالت اولیه آن می‌باشد. کرنش‌سنج‌ها می‌توانند برای چهار گروه کلی محوری، برشی، خمشی و پیچشی به کار برده شوند. باین‌وجود نوع محوری و خمشی متداول‌ترین نوع کرنش‌سنج‌ها می‌باشند. ابعاد کرنش‌سنج‌ها از چند میلی‌متر مربع تا چند سانتی‌متر مربع است و دارای مقاومتی از چند ده تا چند هزارم اهم می‌باشند. کاربرد کرنش‌سنج‌ها در توربین‌های بادی اندازه‌گیری کرنش مربوط به تیغه و روتورها می‌باشد [1,4,7,8,9].

۲-۷- اثرات الکتریکی (Electrical effects)

پایش وضعیت تجهیزات الکتریکی مانند ژنراتور، موتور و باتری‌ها غالباً از طریق اندازه‌گیری ولتاژ و جریان صورت می‌پذیرد. در شبکه‌های ولتاژ بزرگ و متوسط اندازه‌گیری دشارژ ولتاژ بسیار اهمیت دارد. تحلیل طیفی جریان استاتور ژنراتور می‌تواند برای تشخیص خرابی‌های نهفته در سیستم کابل رسانی بدون تأثیر بر

هرتز از حس‌گر سرعت؛ و در اندازه‌گیری فرکانس‌های بالای ۲۰۰۰ هرتز از حس‌گر شتاب استفاده می‌گردد [۱، ۴ و ۵].

۲-۲- آکوستیک امیشن (Acoustic Emissions)

آکوستیک امیشن (AE) پدیده‌ای است که در اثر ایجاد و انتشار یک موج الاستیک در محدوده مافوق صوت (ZMH 1- ZHK 20) رخ می‌دهد. بر همین اساس، پایش وضعیت به روش آکوستیک امیشن شامل دریافت سیگنال‌های منتشرشده در تجهیزات توسط حس‌گرهای مخصوص و برقراری ارتباط بین سیگنال‌های دریافتی و تغییرات ایجادشده بر روی تجهیزات می‌باشد. این روش برای پایش وضعیت فرآیندهایی که در آن سیال با فشار بالا یا پدیده‌های فعال مکانیکی وجود دارد، مناسب می‌باشد. در این روش، سیگنال‌های فرکانس بالا توسط حس‌گرهای مخصوص ثبت شده و نتایج به صورت داده‌های عددی شامل پارامترهای دامنه و فرکانس سیگنال‌ها نمایش داده می‌شود. تغییرات این پارامترها در طول زمان به‌عنوان معیاری برای ارزیابی خرابی‌های احتمالی در تجهیزات مورد تحلیل قرار می‌گیرد [۱، ۴، ۵ و ۶].

۲-۳- آنالیز روغن و ذرات فرسایشی

(Lubricant Analysis)

در این روش روغن و ذرات موجود در روغن پارامترهایی هستند که پایش می‌شوند. می‌توان این روش را مشابه آزمایش خون دانست که پزشکان به این طریق به وضعیت سلامتی انسان پی می‌برند. به همین ترتیب در این روش با آزمایش روغن می‌توان وضعیت روغن را که نقشی حیاتی برای بسیاری از ماشین‌آلات دارد را پایش نمود. همچنین از جنس و شکل ذرات موجود در روغن می‌توان به عیب و علت ایجاد آن پی برد. به‌عنوان مثال در این روش می‌توان با اندازه‌گیری عناصر فرسایشی، آلودگی‌ها و... از خرابی اجزای مختلف موتور اعم از پیستون، میل‌لنگ، سیستم سوخت‌رسان، پارگی اتصالات و دیگر اجزای سیستم‌های هیدرولیک و انتقال قدرت مطلع شد [۱، ۴، ۵ و ۶].

۲-۴- ترموگرافی (Thermography)

ترموگرافی یکی از روش‌های پایش وضعیت می‌باشد که بر اساس اندازه‌گیری دمای تجهیزات استوار است. در این روش تغییرات دمای سطوح ماشین با استفاده از تجهیزات خاص (دوربین‌های مخصوص) در محدوده مادون‌قرمز ثبت و تحلیل می‌گردد. به‌طورکلی، جریان حرارت در نقاط مختلف ماشین‌آلات را که در اثر کارافتادگی قطعات و اتصالات رخ می‌دهد (به‌طور مثال در اتصالات الکتریکی) را می‌توان با این روش ردیابی کرده و عیوبات را تشخیص داد. ترموگرافی علاوه بر تجهیزات الکتریکی برای

اصلاحی، وضعیت را نرمال نمود. این تکنیک به‌ویژه برای توربین‌ها، پمپ‌ها، فن‌ها، مبدل‌های حرارتی، بویلرها و... از اهمیت خاصی برخوردار است. کاربرد این تست در تیغه و ژنراتور توربین بادی می‌باشد [۱،۴،۵].

۲-۱۰- بازرسی رادیوگرافیک (Radiographic inspection)

در بازرسی رادیوگرافیک از اشعه ایکس برای پرتونگاری استفاده می‌شود. پرتو به جسم تابیده و به علت طول‌موج کم اشعه‌ها جذب قطعه می‌گردد. اگرچه این روش اطلاعات مفیدی را از اجزای سازه مورد بازدید فراهم می‌آورد اما استفاده از این روش به‌ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. عکس‌برداری رادیوگرافی وابسته به سطوح مختلف از جذب فوتون‌هایی می‌باشد که از میان مواد عبور می‌کنند. جهت تشخیص خستگی‌های شدید، خوردگی و شکاف‌های کمتر از $50\mu\text{m}$ از روش عکس‌برداری با اشعه ایکس استفاده می‌گردد. عکس‌برداری با این روش جهت تشخیص عیوب داخلی توربین‌های بادی مفید بوده و مزیت اصلی دقت آن می‌باشد. سیستم رادیوگرافی پرتابل به‌عنوان یک راه‌حل جهت تشخیص عیوب و کاهش هزینه بازرسی مطرح می‌گردد. هرچه طول‌موج کوتاه‌تر باشد قدرت نفوذ پرتو در داخل جسم بیشتر است. تمام تابش در جسم نفوذ نمی‌کند بلکه قسمتی از آن جذب می‌شود. مقدار جذب تابعی از چگالی و ضخامت جسم می‌باشد. کاربرد این روش در تشخیص عیوب تیغه‌های توربین از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد [۱،۴،۵،۶].

۲-۱۱- استاندارد (American Society for Testing and Materials) ASTM

یک سازمان بین‌المللی توسعه استاندارد است. این سازمان استانداردهای فنی را به‌صورت داوطلبانه تعریف و به چاپ می‌رساند. این استانداردها گستره‌ی وسیعی از مواد تولیدات، سیستم‌ها و وسیله‌ها را شامل می‌شود. ASTM دارای بیش از ۱۲۰۰۰ استاندارد است که در ۷۷ جلد به‌صورت سالانه چاپ و منتشر می‌شود [۱۲].

۳- استانداردها و شاخص‌های تعریف‌شده روانکار

استفاده از روانکارهای روغن سهم قابل‌توجهی از خرید سازمان‌های عمرانی را شامل می‌شود، از آنجاکه این محصول در سلامت ماشین‌آلات و افزایش راندمان آن‌ها و همچنین اجرای هرچه‌بهرتر پروژه اثرگذار است و اینکه در مواردی در سطوح کارگاهی در اجرای این امر کمبود اطلاعات تحلیلی وجود دارد (در واقع در بسیاری از موارد صرفاً به تحلیل آزمایشگاه اکتفا نموده و این در حالی است که اطلاعات آزمایشگاه‌ها دارای نواقص

عملکرد توربین بسیار مفید باشد. مقاومت الکتریکی می‌تواند جهت ارزیابی ساختار اجزای خاصی از توربین بادی مورداستفاده قرار گیرد. تغییرات ناگهانی مقاومت الکتریکی جهت تشخیص خستگی، شکست و خوردشدگی مورداستفاده قرار می‌گیرد. کاربرد این تست در برج، ژنراتور و تیغه‌های توربین می‌باشد [۱،۴،۷،۸،۹].

۲-۸- شاک پالس (Shock Pulse)

یاتاقان‌های غلظتی طول عمر محدود و مشخصی داشته و معمولاً پس از اتمام طول عمرشان باید تعویض شوند؛ اما در حین کار می‌توان آن‌ها را پایش نموده و با بررسی وضعیت ارتعاشی آن‌ها نسبت به ادامه کار یا تعویض آن تصمیم‌گیری کرد. تشخیص به‌موقع عیب یاتاقان در دستگاه‌های دوار می‌تواند از توقف ناگهانی و بدون برنامه‌ریزی جلوگیری کرده و برنامه‌ریزی و داشتن زمان کافی جهت سفارش یاتاقان جایگزین را امکان‌پذیر می‌نماید. عیوب یاتاقان‌ها معمولاً ناشی از جدا شدن موضعی مواد، ترک‌های ناشی از خستگی روی سطوح تماسی و خورد شدن یا ترک برداشتن اجزا غلظتی یعنی ساچمه‌ها و رولرها می‌باشد که در اثر روغن کاری ناقص و یا اعمال نیروهای اضافی روی آن‌ها می‌تواند اتفاق بیفتد. تکنیک تشخیص عیوب یاتاقان با دیگر عیوب ارتعاشی تفاوت دارد زیرا خرابی یاتاقان پالس‌های بسیار کم انرژی در فرکانس‌های بالا تولید می‌کند که عملاً این پالس‌ها در ارتعاشات ناشی از عیوب دیگر که عمدتاً مضاربی از دور ماشین هستند کم می‌شوند [۱۱،۱۰،۹،۱].

۲-۹- آنالیز کارایی (Performance Monitoring)

آنالیز کارایی یکی از تکنیک‌های مهم پایش وضعیت است که برای انواع مختلف تجهیزات به‌ویژه تجهیزاتی که در واحدهای فرآیندی به کار می‌روند و تجهیزاتی که آنالیزهای دیگر مانند ارتعاشات جوابگوی پایش کامل آن‌ها نیست کاربرد دارد.

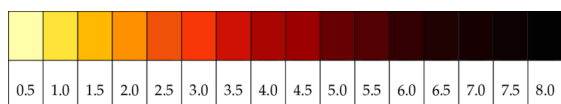
جمع‌آوری اطلاعات اولیه (مانند دبی، فشار، دما، آمپر مصرفی و...) به کمک انواع گیج‌ها، نشانگرها، سنسورها و ترانس‌میتورها صورت می‌پذیرد. ارتباط بین پارامترهایی مثل قدرت، سرعت باد، زاویه تیغه و سرعت روتور جهت ارزیابی، پایش و تشخیص خرابی‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. برخی از این وسایل اندازه‌گیری دارای نشان‌دهنده در محل هستند و اطلاعات برخی دیگر از طریق سیستم کنترل مرکزی قابل‌دستیابی است.

پارامترهای بیان‌کننده کارایی ماشین (نظیر راندمان، هد تولیدی و...) به کمک فرمول‌ها و روابط ریاضی و بر اساس اطلاعات اولیه محاسبه می‌شوند. با trend کردن مقادیر پارامترهای بیان‌کننده کارایی ماشین در طول عمر آن، هرگونه انحراف از وضعیت نرمال مشخص شده و می‌توان با انجام اقدام

جدول (۱). شماره رنگ روغن

شماره رنگ
۰/۵ - ۸

جدول (۱) مربوط به روغن‌های نو می‌باشد و از آنجایی که نوع روغن پایه و افزودنی‌ها نقش قابل توجهی در رنگ روغن ایجاد می‌کنند در خصوص کنترل کیفی روغن نو می‌بایست به مشخصه فیزیکی ارائه شده توسط تولیدکننده روغن مراجعه نمود.



شکل (۲). طبقه‌بندی ظاهری رنگ‌ها

آزمایش رنگ روغن از طریق آزمایش استاندارد ASTM D1500 تعیین می‌شود.

۲-۳- نقطه اشتعال باز (Flash point open)

پایین‌ترین درجه حرارتی است (°C) که در این دما روغن موتور در ظرفی در باز به اندازه کافی به بخار تبدیل و با ترکیب آن با هوا یک مخلوط قابل اشتعال را به صورتی ایجاد می‌کند که با نزدیک شدن شعله به آن، روغن در یک لحظه مشتعل و سپس خاموش می‌گردد، تست مذکور بر اساس استاندارد ASTM D92 تعیین شده و برای روغن‌های نو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول (۲). حداقل مجاز نقطه اشتعال

گرید xW40 xW50 20,30	گرید ۵۰،۴۰	درجه سانتی‌گراد	حداقل مقدار نقطه اشتعال
۲۰۰	۲۲۰		

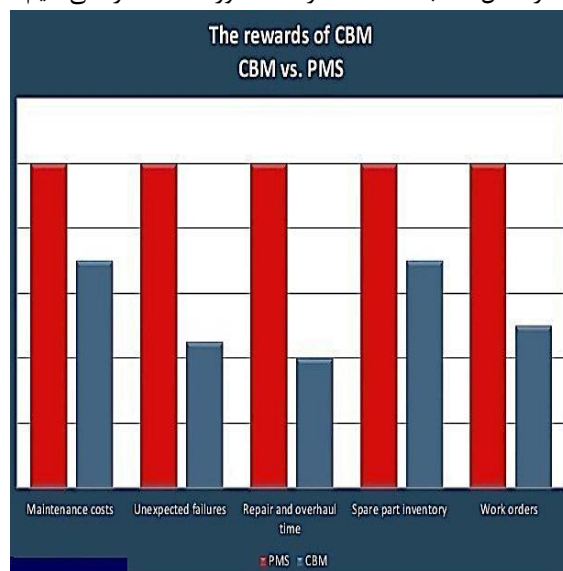
جدول (۲) به حداقل دمای روغن به تفکیک گرید اشاره نموده است، مقادیر کمتر قابل قبول نیست [14-17].

۳-۳- نقطه اشتعال بسته (Flash point close)

این آزمایش برای روغن‌های کارکرده موتور از این نظر اهمیت دارد که مقدار آلودگی سوخت حل شده در روغن را مشخص می‌نماید. سوخت یا مواد شیمیایی حل شده، با کاهش گرانی روغن، به شدت به کارایی روانکار آسیب رسانده و می‌تواند باعث آتش‌سوزی و خطر انفجار شود. مقادیر کمتر از ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده وجود آلودگی سوخت در روغن موتور است، این تست بر اساس استاندارد ASTM D3828 تعیین می‌گردد [14-17].

عده‌ای هستند) بر آن شدیم تا با بررسی و به دست آوردن شاخص‌ها این مشکل را مرتفع نماییم، حال در زیر به نوع آزمایش‌ها و محدوده شاخص‌های دست‌یافته اشاره می‌نماییم.

در شکل (۱) به اطلاعات شرکت مشاور DNV اشاره می‌کنیم:



شکل (۱). اثرگذاری CM بر کاهش هزینه‌ها

همان‌طور که مشاهده می‌کنید در زمان اجرای CM در پروژه‌ای که صرفاً تحت پوشش نت پیشگیرانه بود (PM) هزینه‌های تعمیر و نگهداری ۳۰ درصد، خرابی‌های غیرمنتظره ۵۵ درصد، زمان بازسازی و تعمیرات ۶۰ درصد، درخواست قطعات یدکی ۳۰ درصد و حکم کار خرابی‌ها ۵۰ درصد کاهش داشته است [۱۳].

۱-۳- رنگ روغن (Colour)

در بیشتر روغن‌های تولیدی رنگ روغن ناشی از روغن پایه مصرفی و مواد افزودنی آن است و بسته به این که روغن پایه و مواد افزودنی چگونه و از کجا تأمین شده باشد رنگ روغن ممکن است از زرد بسیار کم‌رنگ تا قهوه‌ای تغییر کند. برای روغن‌های معدنی به علت وجود اختلاف در روغن‌های پایه در رنگ و یا تیرگی آن‌ها، تغییرات جزئی قابل مشاهده می‌باشد. به‌طور کلی رنگ روغن‌های معدنی با ناخالصی‌های ترکیبات گوگرد و آروماتیک در ارتباط می‌باشد. در روغن‌های پایه تیره‌تر، معمولاً این ناخالصی‌ها بیشتر رؤیت می‌شود. رنگ تیره، بیشتر در روغن‌های معدنی با ویسکوزیته بالاتر قابل مشاهده می‌باشد. بعضی افزودنی‌های خاص همچون آن‌هایی که دارای گوگرد می‌باشند در رنگ روغن تأثیرگذار می‌باشند. برای مثال مواد پاک‌کننده همچون کلسیم سولفات‌ها رنگ روغن نهایی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای تیره‌تر می‌کند. با توجه به موارد ذکر شده رنگ‌بندی روغن‌ها مطابق جدول زیر دسته‌بندی می‌شوند [۱۴-۱۶].

قابل قبول گرانیروی روغن با گرید 20W50 در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد محدوده ۲۱,۹-۱۶,۳ Cst (سانتی استوک) است [۱۴-۱۸].

۳-۶- گرانیروی ظاهری در دمای منفی استارت موتور (CCS)

برای تعیین عملکرد عملیاتی روغن نو در دمای پایین، از آزمون شبیه‌ساز استارت سرد (Cold Cranking Simulator) CCS در درجه حرارت بین ۱۰- تا ۳۵- درجه سانتی‌گراد بر اساس روش استاندارد ASTM D5293 استفاده می‌شود و مقدار گرانیروی دینامیک با واحد زیر گزارش می‌گردد.

m.Pa.Sec (میلی پاسکال ثانیه) = CP (سانتی پواز)

جدول (۴). حداکثر مجاز CCS

گرید روغن	حداکثر مقدار گرانیروی دینامیک در دمای پایین (mPa.s) CCS
0W	6200 در دمای ۳۵-
5W	۶۶۰۰ در دمای ۳۰-
10W	۷۰۰۰ در دمای ۲۵-
15W	۷۰۰۰ در دمای ۲۰-
20W	۹۵۰۰ در دمای ۱۵-
25W	۱۳۰۰۰ در دمای ۱۰-

در جدول (۴) به‌عنوان مثال حداکثر گرانیروی دینامیک CCS برای روغن 10W30 مقدار ۷۰۰0 mPa.s بوده و مقادیر بیشتر قابل قبول نیست [۱۴-۱۶].

۳-۷- گرانیروی ظاهری در دمای منفی پمپاژ روغن (MRV)

برای تعیین عملکرد عملیاتی روغن نو در دمای پایین، از آزمون گرانیروی ظاهری در دمای منفی مربوط به پمپاژ روغن Mini-MRV (Rotary Viscometer) در درجه حرارت بین ۱۵- تا ۴۰- درجه سانتی‌گراد بر اساس روش استاندارد ASTM D4684 استفاده می‌شود.

جدول (۵). حداکثر مجاز MRV

گرید روغن	حداکثر مقدار گرانیروی دینامیک MRV در دمای پایین (mPa.s)
۰W	۶۰۰۰۰ در دمای ۴۰-
۵W	۶۰۰۰۰ در دمای ۳۵-
۱۰W	۶۰۰۰۰ در دمای ۳۰-
۱۵W	۶۰۰۰۰ در دمای ۲۵-
۲۰W	۶۰۰۰۰ در دمای ۲۰-
۲۵W	۶۰۰۰۰ در دمای ۱۵-

۳-۴- سنجش تراکم ذرات فرسایشی (PQ)

با توجه به اینکه فلز آهن در ساختار اکثر ماشین‌آلات حضور دارد، لذا استفاده از روشی که بتواند تراکم ذرات درشت آهنی را در نمونه روغن مشخص نماید، در شناخت وضعیت فرسایش در ماشین‌آلات راهگشا خواهد بود. تکنیک PQ در واقع به‌عنوان یک روش برای اندازه‌گیری میزان ذرات فرسایشی آهنی در نمونه‌های روغن بکار برده می‌شود. این تکنیک برای اندازه‌گیری ذرات درشت فرسایشی با خاصیت آهن‌ربایی (آهنی آزاد) در روغن است.

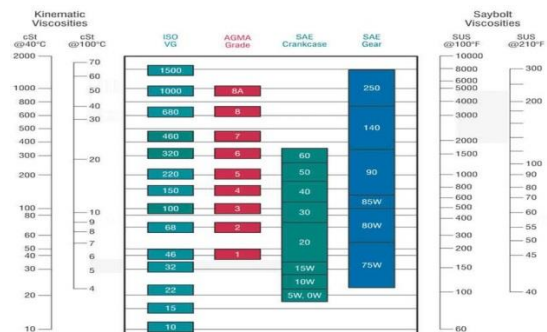
جدول (۳). حداکثر مجاز PQ

نوع روغن	حداکثر مقدار PQ
دنده	۱۵۰
هیدرولیک	۲۰
موتور	۲۰

در جدول (۳) حداکثر مجاز PQ برای روغن‌های دنده، هیدرولیک و موتور کار کرده نشان داده شده و مقادیر بیشتر می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد [۱۴-۱۸].

۳-۵- گرانیروی (Viscosity)

گرانیروی میزان اصطکاک داخلی روانکار یا مقاومت در مقابل جریان است. گرانیروی سینماتیک، اندازه‌گیری مقاومت یک سیال برای جریان یافتن، در شرایط نیروی ثقل است. این مقیاس با اندازه‌گیری زمان به ثانیه برای حرکت حجم مشخصی از سیال که تحت شرایط ثقل، فاصله تعیین‌شده‌ای را در لوله موئین کالیبره شده، طی نماید، صورت می‌گیرد، درحالی‌که فشار و دما به‌دقت کنترل شده است. گرانیروی بر کار دستگاه، کاهش اصطکاک و ضخامت فیلم روغن یاتاقان‌ها اثر می‌گذارد. بنابراین، اندازه‌گیری و بررسی روند آن در برنامه آنالیز روغن بسیار حساس است. آزمایش گرانیروی در دماهای ۴۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با استاندارد ASTM D445 تعیین می‌شود.



شکل (۳). معادل‌یابی روغن‌ها

در شکل (۳) معادل روغن‌ها به تفکیک استانداردهای SAE، ISO VG و AGMA ارائه شده است. به‌عنوان مثال مقادیر

است که جریان روانکار می‌تواند ادامه یابد. این تست بر اساس استاندارد ASTM D97 تعیین می‌گردد.

جدول (۶). حداکثر مجاز Pour point

گراید	گراید	گراید	گراید	درجه سانتی‌گراد	حداکثر مقدار نقطه ریزش
Wx۰	15Wx	25Wx	۵۰،۴۰		
5Wx 10Wx	20Wx	20,30			
	-۲۴	-۱۸	-۹		

در جدول (۶) به حداکثر مقادیر نقطه ریزش روغن نو اشاره شده است و مقادیر بیشتر قابل قبول نیست [14-17].

۳-۱۰- خردگی مس (Copper corrosion)

با این تست معیاری از میزان خوردگی روغن در برابر فلز مس به دست می‌آید، این آزمایش عموماً جهت روغن‌های توربین، کمپرسور و هیدرولیک استفاده می‌شود. این تست بر اساس استاندارد ASTM D130 تعیین می‌گردد. حداکثر مقدار مجاز روغن نو در این تست 1b است [۱۴،۱۵].

۳-۱۱- فراریت روغن (Noack)

هدف از انجام این آزمون اندازه‌گیری اتلاف تبخیر روغن‌های روانکار نو بالأخص روغن‌های موتور است.

جدول (۷). حداکثر مجاز فراریت روغن موتور

بقیه گریدها	گراید	گراید	گراید	درصد وزنی	حداکثر مقدار فراریت روغن
	20Wx	25Wx	۴۰،۵۰		
	۱۰	۶	۵		
۱۵					

مطابق جدول (۷)، به‌عنوان مثال حداکثر فراریت روغن 20W40 مقدار ۱۰ درصد بوده و مقادیر بیشتر غیرقابل قبول است [۱۴-۱۶].

۳-۱۲- شمارش ذرات (Particle counter)

در این روش، تعداد ذرات موجود در نمونه روغن، در اندازه‌های مشخص، برحسب حجم سیال (معمولاً برحسب ۱ ml یا ۱۰۰ ml) ارائه می‌شود. استانداردهای این روش ISO ۴۴۰۶ و NAS ۱۶۳۸ هستند.

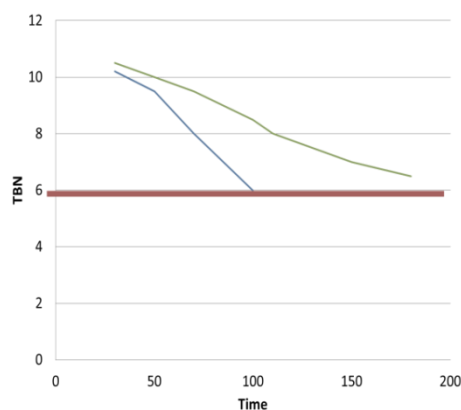
مطابق جدول ۸ محدوده قابل قبول PC به تفکیک نوع سیال ارائه شده است [۱۴-۱۷].

مطابق جدول (۵) به‌عنوان مثال حداکثر گرانیروی دینامیک MRV برای روغن 10W30 مقدار 60000 mPa.s بوده و مقادیر بیشتر قابل قبول نیست [۱۷-۱۴].

۳-۸- عدد قلیابیت (TBN)

این آزمایش شدت قلیابیت روغن‌موتورها را مشخص می‌کند. روغن‌های موتور دارای مواد افزودنی تأمین‌کننده ذخیره قلیابیت، برای خنثی‌سازی اسیدی است که در جریان احتراق تولید می‌شود. وقتی این ذخیره پایان یابد، روغن می‌تواند به‌شدت خردگی ایجاد نماید. این تست بر اساس استانداردهای ASTM D974، ASTM D2896، ASTM D4739 تعیین می‌گردد. کاهش TBN روغن موتور به کمتر از ۶۰ درصد مقدار اولیه محدوده‌ی بحرانی بوده و روغن می‌بایست تعویض گردد. به‌عنوان مثال زمانی که TBN یک روغن موتور نو با گراید 15W40 مقدار $11 \frac{mg\ KOH}{g}$ است، TBN روغن کارکرده نباید از ۶/۶ کمتر گردد.

مقدار گوگرد موجود در سوخت از اهمیت بالایی برخوردار بوده و مطابق شکل ۴ طی تحقیقات انجام‌شده اگر محتوای گوگرد سوخت از ۰/۵٪ به ۱٪ افزایش یابد فرسایش ۴ برابر افزایش خواهد شد و میزان TBN افت قابل توجهی خواهد یافت [14-17].



شکل (۴). تأثیر میزان گوگرد بر افت خاصیت قلیابیتی

۳-۹- نقطه ریزش روانکار (Pour point)

بسیاری از انواع ماشین‌آلات در شرایط سرد استارت زده می‌شوند و توانایی یک روانکار در جریان یافتن و روانکاری مناسب در زمان استارت (دقیقاً بلافاصله پس از استارت)، یک فاکتور مهم در انتخاب روانکار است. وقتی یک روانکار به‌اندازه کافی سرد است، به نقطه‌ای خواهد رسید که تحت آن شرایط روغن با نیروی ثقل خود دیگر جریان نخواهد یافت. در این دما، روغن وظیفه اصلی خود را انجام نخواهد داد. در واقع نقطه ریزش پایین‌ترین دمایی

می‌تواند منجر به کاهش مصرف سوخت و محافظت بهتر از موتور گردد. روغن‌های با ویسکوزیته HTHS پائین باعث بهبود مصرف سوخت و روغن‌های با ویسکوزیته HTHS بالاتر باعث حفاظت بهتر قطعات موتور (Ring-Liner) در برابر سایش می‌شوند. با توجه به اهمیت کاهش مصرف سوخت و استفاده از روغن‌های با ویسکوزیته HTHS پائین (کمتر از ۳/۵ سانتی پواز)، ممکن است تولیدکنندگان موتور به منظور کنترل سایش و دوام موتور مجبور به طراحی مجدد موتورها شوند. زمانی که روغن در دما و سرعت برشی بالا قرار گیرد ساختار پلیمر در جهت تنش ایجادشده به صورت برگشت‌پذیر تغییر کرده و منجر به کاهش موقتی ویسکوزیته می‌شود، کاهش بیش از حد ویسکوزیته منجر به سایش شدید قطعات خواهد شد، بنابراین کیفیت پلیمر و تعادل دقیق در هنگام فرموله کردن روغن موتور مالتی‌گرید نو بسیار حائز اهمیت می‌باشد. استانداردهای ASTM D4683 و ASTM D4741 روش‌های اندازه‌گیری ویسکوزیته HTHS در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشند. حداقل مقدار مجاز ویسکوزیته HTHS مطابق جدول زیر می‌باشد [۱۶-۱۲].

جدول (۹). حداقل مقادیر مجاز HTHS

حداقل گرانروی دینامیکی در 150°C با سرعت برشی بالا	درجه گرانروی
۲/۶	۲۰
۲/۹	۳۰
۳,۵ (درجه‌های 0w40, 5w40, 10w40)	۴۰
۳,۷ (درجه‌های 15w40, 20w40 و 25w40 و ۴۰)	۴۰
۳/۷	۵۰
۳/۷	۶۰

۱۶-۳ آنالیز عنصری

آنالیز عنصری (Elemental Analysis)، آزمایشی است که به روش‌های مختلف و به کمک دستگاه‌های پیشرفته صورت گرفته و از طریق آن، کلیه عناصر موجود در روغن شناسایی شده و مقدار آن‌ها برحسب ppm به دست می‌آید.

این آزمایش به دو روش الکتروود دیسکی چرخان (۵۱۸۵ ASTM D) و پلاسمای کوپل شده القایی (۶۵۹۵ ASTM D) انجام می‌شود. روش الکتروود دیسکی چرخان (RDE) قادر به تشخیص ذرات با اندازه‌های کمتر از ۸μm بوده و روش پلاسمای کوپل شده القایی (ICP) ذرات کوچک‌تر از ۳μm را شناسایی می‌کند. لازم به ذکر است هر دو روش مذکور برای سنجش ذرات درشت‌تر از این مقادیر، ناتوان هستند [۱۴-۸].

جدول (۸). محدوده قابل قبول PC

نوع سیال	محدوده قابل قبول بر اساس روش ISO 4406	محدوده قابل قبول بر اساس روش NAS1638
روغن هیدرولیک نو	.../۱۷/۱۴	۸
روغن توربین و کمپرسور نو	.../۱۷/۱۴	۸
سوخت	.../۱۸/۱۵	۹

تست شمارش ذرات برای روغن‌های دنده و موتور، مرسوم نمی‌باشد. علاوه بر موارد مورداشاره در این مقاله سطح تمیزی بر اساس مشخصات تجهیز (کتابچه نگهداری و تعمیرات) و همچنین توافق با تأمین‌کننده محصول بررسی می‌گردد.

۱۳-۳ آلودگی سوخت در روغن

با مخلوط شدن مقادیر کم سوخت در روغن موتور، گرانروی آن به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. پس از انجام تست نقطه اشتعال بسته و مشخص شدن وجود سوخت در روغن، از تست Fuel Dilution برای تعیین درصد حجمی سوخت موجود در روغن استفاده می‌گردد. مقادیر بزرگ‌تر از یک درصد حجمی سوخت، هشدار بوده و روغن می‌بایست تعویض گردد.

آزمایش آلودگی سوخت از طریق آزمایش استاندارد ASTM D3524 تعیین می‌شود [14-16].

۱۴-۳ پایداری برشی

درصد افت گرانروی در ۱۰۰°C برای روغن‌های نو حاوی مواد افزودنی پلیمری، توسط دستگاه اینجکتور (Injector) دیزلی طی ۳۰ سیکل گردش روغن، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. افت گرانروی بستگی به تخریب مواد پلیمری روغن در اثر عبور از نازل دارد.

درصد افت گرانروی روغن تحت آزمایش به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V_l = \frac{(V_u - V_s)}{V_u} \times 100$$

V_l = درصد افت گرانروی

V_u = گرانروی سینماتیک روغن قبل از آزمایش در 100°C

V_s = گرانروی سینماتیک روغن بعد از آزمایش در 100°C

درصد افت گرانروی پایین‌تر نشان‌دهنده مرغوبیت روغن بوده و روغنی که گرانروی آن پس از آزمایش در محدوده گرانروی قبل از آزمایش باشد مرغوب می‌باشد. تست پایداری برشی از طریق آزمایش استاندارد ASTM D6278 تعیین می‌شود [۱۶-۱۳].

۱۵-۳ ویسکوزیته HTHS

ویسکوزیته در دمای بالا (۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) و سرعت برشی زیاد، یک ویژگی مهم روغن نو موتور مالتی‌گرید محسوب شده و

است که در صورت اجرای کلیه موارد و رعایت شاخص‌های ارائه شده در این مقاله هزینه‌های نگهداری و تعمیرات حداقل با کاهش ۴۰ درصدی مواجه خواهد شد.

۵- مراجع

- [1] Eskandarzadeh Sabet, A., & Torkaman K. (2020). Implementing Condition Monitoring In Wind Turbines To Reduce Maintenance Costs Using SCADA Data Analysis Method. Engineering And Quality Management. (In Persian)
- [2] On-Site Oil Analysis. (2020). "Is It A Replacement For Lab Analysis?" <https://www.machinerylubrication.com/Read/982/On-site-Oil-Analysis-Lab>
- [3] Yan, S., Biao, M. A., Wang, X., Chen, J., & Zheng, C. (2020). Maintenance Policy For Oil-Lubricated Systems With Oil Analysis Data Polityka Utrzymania Ruchu Układów Smarowanych Olejem W Oparciu O Dane Z Analizy Oleju. Eksploatacja I Niezawodność, 22(3), 455.
- [4] Harwood, J., & Aparicio, R. (Eds.). (2000). Handbook Of Olive Oil: Analysis And Properties (P. 620). Gaithersburg, MD: Aspen.
- [5] Pedregal, D. J., García, F. P., & Roberts, C. (2009). An Algorithmic Approach For Maintenance Management Based On Advanced State Space Systems And Harmonic Regressions. Annals Of Operations Research, 166(1), 109-124.
- [6] J. C. Fitch, D. D. Troyer, (1999). Oil Analysis Basics, Noria Corporation.
- [7] Degaspari, J. (1999). Recording Oil's Vital Signs. Mechanical Engineering, 121(05), 54-56. [3] Rao, B.
- [8] K. N. (1993). Profitable Condition Monitoring & Diagnostic Engineering Management. In Profitable Condition Monitoring (Pp. 37-44). Springer, Dordrecht.
- [9] Troyer, D. (1998). Why Oil Analysis Should Be Performed On Site. Noria Corporation, Oil Analysis. Com.
- [10] Joyce, C. S. (1996). U.S. Patent No. 5,537,336. Washington, DC: U.S. Patent And Trademark Office.
- [11] Harwood, J., & Aparicio, R. (Eds.). (2000). Handbook Of Olive Oil: Analysis And Properties (P. 620). Gaithersburg, MD: Aspen.
- [12] ASTM International, (2020). "What Is ASTM" <https://fa.wikipedia.org>.
- [13] <https://www.dnv.com>.
- [14] Rao, B. K. N. (Ed.). (2012). Profitable Condition Monitoring. Springer Science & Business Media.
- [15] Lukas, M., & Anderson, D. P. (1998). Laboratory Used Oil Analysis Methods. Tribology & Lubrication Technology, 54(11), 19.
- [16] <http://standard.isiri.gov.ir>.
- [17] Mohammed, M. (2021). "Application And Evaluation Of Multi-Sensor Fusion Technology In Diesel Engine Oil Analysis"-A Review (Doctoral Dissertation, Politecnico Di Torino).
- [18] Malaguti, R., Lourenço, N., & Silva, C. (2021, September). Wear And Tear: A Data Driven Analysis Of The Operating Condition Of Lubricant Oils. In IFIP International Conference On Advances In Production Management Systems (Pp. 217-225). Springer, Cham.

سه گروه از عناصر مختلف که بدین طریق شناسایی می‌شوند عبارت‌اند از:

- ذرات فرسایشی (Fe, Al, Cd, Cr, Cu, Ni, ...)
- مواد افزودنی یا ادیتوها (Ba, Ca, Mg, P, Zn, ...)
- آلودگی‌های موجود در روغن (Si, Pb, K, ...)

۳-۱۷- آلودگی آب در روغن

آلودگی آب در روغن، یکی از مهم‌ترین آلوده‌کننده‌های هر سیستمی می‌باشد، در حقیقت بدون وجود آلودگی آب در روغن، عمر روانکارها به چندین برابر افزایش می‌یابد.

ابتدایی و ساده‌ترین روش اندازه‌گیری آب در روغن تست Crackle می‌باشد که اگر آب در روغن وجود داشته باشد به صورت حباب (در اندازه مختلف) درآمده و از روغن خارج می‌گردد به این منظور از دستگاه Hot Plate استفاده می‌شود. امروزه روش‌های آزمایشگاهی جدیدتری جهت اندازه‌گیری آب در روغن همچون کارل فیشر استاندارد ASTM D6304، Water & Sediment استاندارد ASTM D2273 و استاندارد ASTM D96 مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲-۸].

به صورت تجربی مشخص گردیده است، محدوده‌های زیر برای روغن نو و کارکرده محدوده هشدار بوده و می‌بایست وضعیت روغن و تجهیز مورد بررسی قرار گیرد:

- بیش از ۰/۱ درصد وزنی در روغن‌های گردش دنده
- بیش از ۰/۵ درصد وزنی در روغن‌های هیدرولیک، کمپرسور، توربین
- بیش از ۰/۲ درصد وزنی در روغن موتور دیزل

۴- نتیجه‌گیری

امروزه اجرای آنالیز روغن در کشورهای توسعه‌یافته یک امر جدایی‌ناپذیر از حوزه نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات گردیده است، این حوزه در سطح کشورمان نیز نسبت به گذشته توسعه‌هایی داشته است اما به دلیل آنکه تحقیقات کاربردی در این خصوص به صورت جامع ارائه انجام نگردیده است بعضاً مورد توجه کافی قرار نمی‌گیرد، یکی از این موارد نبود شاخص‌های مناسب برای تفسیر نتایج است که کاربر CM نمی‌تواند به خوبی نتایج را تحلیل نموده و شرایط ماشین‌آلات را پایش کند. به عنوان مثال یک پارت روغن نو جهت خریداری احتیاج به تعدادی آزمایش دارد در صورت عدم تطابق خروجی آنالیز روغن با شاخص‌های ذکر شده در این مقاله این موضوع مطرح می‌شود که روغن خریداری شده باز یافتی یا نامرغوب است بنابراین از هزینه‌های زیادی که عدم رعایت این مهم بر سازمان ماشین‌آلات تحمیل می‌نماید جلوگیری می‌گردد، این در حالی